

长白山不同林型土壤有机碳特征

丛高¹, 张志丹¹, 张晋京¹, 徐丽², 何念鹏²

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 采用野外采样与室内分析相结合的方法, 研究了长白山北坡6种不同林型(阔叶林、针叶林、云冷杉、岳桦林、岳桦-苔原、高山苔原)土壤有机碳及其组分的含量, 分析了土壤有机碳分布与铁铝氧化物和黏粒矿物组成之间的关系。结果表明: 不同林型之间, 阔叶林土壤的有机碳、胡敏素碳、颗粒有机碳、2~0.25 mm大团聚体碳和0.25~0.053 mm微团聚体碳含量最高, 云冷杉土壤的易氧化碳含量最高而水溶性有机碳、胡敏酸碳、富里酸碳和颗粒有机碳含量最低; 此外, 岳桦林土壤的胡敏酸碳和富里酸碳含量显著高于其他林型土壤, 岳桦-苔原土壤的水溶性有机碳含量显著高于其他林型土壤, 而高山苔原土壤的有机碳和易氧化碳含量显著低于其他林型土壤。相关性分析表明, 土壤有机碳含量与非晶质氧化铝含量呈显著的正相关关系($P < 0.05$), 富里酸碳含量与游离氧化铝含量呈显著的正相关关系($P < 0.05$), 而0.25~0.053 mm微团聚体有机碳含量与2种形态氧化铝含量都呈显著的正相关关系($P < 0.05$)。上述结果指出, 不同林型条件下各有机碳及其组分差异显著。

关键词: 长白山; 林型; 土壤有机碳

中图分类号: S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)03-0179-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.027

Research on Characteristics of Soil Organic Carbon in Different Forest Types in Changbai Mountain

CONG Gao¹, ZHANG Zhidan¹, ZHANG Jinjing¹, XU Li², HE Nianpeng²

(1. College of Resource and Environmental Science, Jilin Agricultural University,

Changchun 130118; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Simulation,

Institute of Geographic Sciences and Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: The contents of soil organic carbon and its components in six different forest types (including broad-leaved forest, coniferous forest, spruce-fir forest, betula ermanii forest, betula ermanii-tundra transition and tundra) on the northern slope of Changbai Mountain were studied by means of field sampling and laboratory analysis. The distribution of soil organic carbon, iron-aluminum oxides and clay mineral groups were analyzed. The results showed that in different forest types, the contents of organic carbon, humin carbon, particulate organic carbon, 2 ~ 0.25 mm macroaggregate carbon and 0.25 ~ 0.053 mm microaggregate carbon in broadleaf forest soils were the highest. The content of easily oxidized carbon in soil of spruce-fir forest was the highest while that of water-soluble organic carbon, humic acid carbon, fulvic acid carbon and particulate organic carbon were the lowest. In addition, the contents of humic acid carbon and fulvic acid carbon in the soil of betula ermanii forest were significantly higher than those of other forest types. The content of water-soluble organic carbon in the soil of betula ermanii-tundra transition were significantly higher than those of other forest types, while the contents of organic carbon and easily oxidized carbon in the soil of tundra were significantly lower than those of other forest types. Correlation analysis showed that soil organic carbon contents were positively correlated with amorphous alumina contents ($P < 0.05$), fulvic acid carbon contents were positively correlated with free alumina contents ($P < 0.05$), and organic carbon contents of

收稿日期: 2018-11-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471196, 31770655)

第一作者: 丛高(1993—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤有机碳研究。E-mail: 511627386@qq.com

通信作者: 张志丹(1979—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤肥力调控及碳氮循环研究。E-mail: zhidanzhang79@163.com

张晋京(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤化学研究。E-mail: zhangjinjing@126.com

0.25 ~ 0.053 mm microaggregate were positively correlated with the contents of two kinds of alumina ($P < 0.05$). These results indicated that the significant differences in organic carbon and its components were observed under different forest types.

Keywords: Changbai Mountain; forest type; soil organic carbon

气候变暖是当前全球所面临的主要环境问题之一,究其根源是 CO₂ 等温室气体的过度排放。森林作为陆地生态系统最大的碳库,在维持全球碳平衡中起着重要的作用^[1]。森林土壤有机碳储量与林型密切相关^[2],因此研究不同林型土壤有机碳及其影响因素,对维持森林生态系统的稳定性具有积极意义。

通常土壤有机碳根据周转时间的不同可划分为活性有机碳和非活性有机碳,其中活性有机碳主要包括水溶性有机碳、易氧化有机碳和微生物量碳等;非活性有机碳主要包括腐殖质碳、黑碳等^[3]。另一方面,土壤团聚体的形成与有机碳固定密切相关,团聚体结合的有机碳是评价土壤固碳能力的重要指标^[4]。因此,从土壤有机碳组分的角度进行研究,有助于深刻认识土壤有机碳的转化和稳定机制^[5]。

目前,国内外在森林土壤有机碳方面已进行了许多研究^[6-9],包括有机碳储量、微生物量碳、水溶性有机碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳、腐殖质碳等。长白山是东北亚地区的生态屏障,总固碳量占全国 6.92%^[10]。

目前,国内外主要研究了长白山 1 种或 2 种林型(针叶林、阔叶林或白桦林)土壤的有机碳储量以及水溶性有机碳、颗粒有机碳、易氧化碳、微生物量碳和团聚体碳^[11-14]含量。关于不同林型之间土壤有机碳及其组分的差异,尚没有进行系统的比较研究。

本研究以长白山 6 种不同林型的土壤为研究对象,比较了各林型之间土壤有机碳及其组分的差异,同时也分析了土壤有机碳及其组分与土壤及其黏粒中铁、铝氧化物的关系,以期为长白山土壤碳汇管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于吉林省长白山国家级自然保护区(42°01'—42°25' N, 127°43'—128°08' E),海拔 720~2 691 m,年均气温 -7~3 °C,年均降水量 719.3 mm。气候属东亚大陆性季风气候,其中山脚为典型的暖温带气候,而山顶是近极地气候。不同林型基本理化性质见表 1。

表 1 不同林型基本理化性质

林型	海拔/m	pH	CEC/ (cmol · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	砂粒 (2~0.02 mm)/%	粉粒 (0.02~0.002 mm)/%	黏粒 (<0.002 mm)/%
阔叶林	758	5.41±0.03	116.0±0.03	8.18±0.18	41.8	28.8	29.2
针叶林	1124	5.12±0.03	68.1±0.45	4.78±0.07	42.0	25.6	32.4
云冷杉	1458	5.07±0.01	74.3±0.07	5.20±0.01	86.2	8.5	5.3
岳桦林	1927	5.05±0.03	87.5±0.18	6.13±0.08	56.9	25.8	17.2
岳桦林-苔原	2043	4.93±0.03	97.5±0.08	6.57±0.11	76.7	12.8	10.5
高山苔原	2163	5.07±0.04	42.4±0.31	2.09±0.27	87.3	10.2	2.6

注:表中数据为平均值±标准误差。下同。

1.2 土壤样品采集

于 2017 年 6 月沿海拔高度采集了 6 种不同林带(即阔叶林、针叶林、云冷杉、岳桦林、岳桦-苔原和高山苔原)的土壤样品。每种林型选取 4 个 1 m×1 m 的样地,取样深度不超过 10 cm,每个样地随机采集 5 个样点均匀混合(间隔不少于 10 m)。采集的新鲜土样,在实验室内沿其自然裂隙轻轻掰开,使之全部通过 5 mm 孔径筛,风干后分成两部分:一部分用于团聚体分析,其余的进一步磨细过 2,0.25 mm 筛,用于土壤有机碳测定。

1.3 测定方法

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾容量(外加热)法^[15]测定;易氧化有机碳(EOC)采用 KMnO₄ 氧化法^[16]测定;颗粒有机碳(POC)采用六偏磷酸钠提取

法^[15]测定;土壤腐殖质组成采用腐殖质组成修改法^[17]测定;土壤团聚体分级采用湿筛法,利用自动振荡筛将土壤分为大团聚体(2~0.25 mm)、微团聚体(0.25~0.053 mm)和粉黏粒组分(<0.053 mm)^[18],平均重量直径(MWD)为某一粒级团聚体的重量百分比乘以该粒级的平均直径^[19];黏粒提取采用吸管法^[15];游离态铁铝氧化物和非晶质铁铝氧化物分别采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠和草酸铵-草酸提取,可见分光光度法^[15]测定。

1.4 统计分析

统计分析采用 SPSS 19.0 软件,用单因素方差分析(One-way ANOVA)考察不同林型之间土壤有机碳及其组分的差异,最小显著差异(LSD)法进行多重比较;用双变量相关分析土壤有机碳及其组分、颗粒

组成、游离态和非晶质铁铝氧化物之间的相关性;显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同林型土壤有机质及土壤腐殖质组分碳含量

由表2可知,土壤有机碳含量范围在43.6~81.7 g/kg。不同林型土壤相比,阔叶林土壤有机碳含量最

表2 不同林型土壤及其腐殖质组分的有机碳含量

林型	SOC/ (g · kg ⁻¹)	WSOC/ (g · kg ⁻¹)	HEC/ (g · kg ⁻¹)	HAC/ (g · kg ⁻¹)	FAC/ (g · kg ⁻¹)	HUC/ (g · kg ⁻¹)	HAC/FAC
阔叶林	81.7 ± 0.14a	0.63 ± 0e	15.4 ± 0.06c	7.71 ± 0.06b	7.71 ± 0.08c	65.7 ± 0.13a	1.00 ± 0.02d
针叶林	48.4 ± 0.14e	0.70 ± 0.01d	12.4 ± 0.03e	6.52 ± 0.02d	5.90 ± 0.03d	35.3 ± 0.14e	1.11 ± 0.01b
云冷杉	50.5 ± 0.51d	0.55 ± 0f	6.3 ± 0.03f	2.09 ± 0.04e	4.25 ± 0.04f	43.7 ± 0.51b	0.49 ± 0.01f
岳桦林	54.6 ± 0.15c	0.79 ± 0.01b	16.8 ± 0.01a	8.70 ± 0.09a	8.09 ± 0.09a	37.0 ± 0.44d	1.08 ± 0.02c
岳桦林-苔原	55.1 ± 0.13b	0.82 ± 0a	15.8 ± 0.35b	7.79 ± 0.06b	7.96 ± 0.06b	38.6 ± 0.13c	0.98 ± 0.01e
高山苔原	43.6 ± 0.56f	0.73 ± 0c	12.7 ± 0.06d	7.06 ± 0.06c	5.67 ± 0.06e	30.2 ± 0.57f	1.25 ± 0.01a

注:同列不同小写字母表示不同林型土壤有机碳及其组分的含量差异显著($P < 0.05$)。下同。

土壤可提取腐殖质碳(HEC)、胡敏酸碳(HAC)、富里酸碳(FAC)和胡敏素碳(HUC)的含量范围分别为6.3~16.8,2.09~8.70,4.25~8.09,30.2~65.7 g/kg,约占土壤有机碳总量的12.5%~30.7%,4.13%~16.2%,8.40%~14.8%,67.8%~86.4%。不同林型土壤相比,HEC和HAC均以岳桦林土壤中最高,其次分别为岳桦-苔原、阔叶林、高山苔原、针叶林和云冷杉土壤;FAC也是以岳桦林土壤最高,其次分别为岳桦-苔原、阔叶林、针叶林、高山苔原和云冷杉;HUC则是以阔叶林土壤最高,其次分别为云冷杉、岳桦-苔原、岳桦林、针叶林和高山苔原土壤。从HAC/FAC

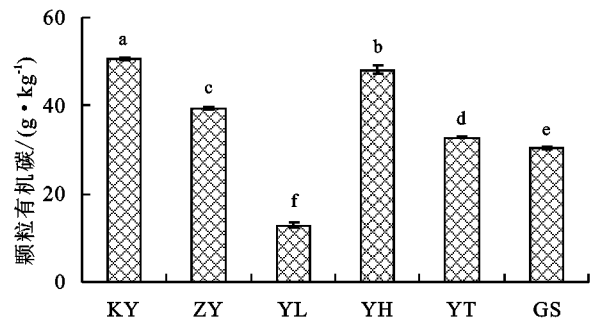
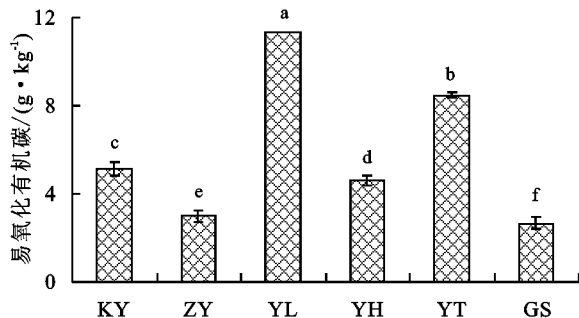
高,其次分别为岳桦-苔原、岳桦林、云冷杉和针叶林土壤,而高山苔原土壤的有机碳含量最低。

由表2可知,土壤水溶性有机碳含量范围在0.55~0.82 g/kg,约占土壤有机碳总量的0.78%~1.67%。不同林型土壤相比,岳桦-苔原土壤中水溶性有机碳的含量最高,其次分别为岳桦林、高山苔原、针叶林、阔叶林和云冷杉土壤。

比值来看,高山苔原土壤最高,其次分别为针叶林、岳桦林、阔叶林、岳桦-苔原和云冷杉土壤。

2.2 不同林型土壤易氧化及颗粒有机碳含量

由图1可知,易氧化有机碳含量范围在2.68~11.3 g/kg,约占土壤有机碳总量的6.12%~22.4%。不同林型土壤相比,云冷杉土壤中易氧化有机碳含量最高,其次分别为岳桦-苔原、阔叶林、岳桦林、针叶林和高山苔原土壤。颗粒有机碳含量范围在12.8~50.7 g/kg,约占土壤有机碳总量的25.3%~88.0%。不同林型土壤相比,阔叶林土壤中颗粒有机碳含量最高,其次分别为岳桦林、针叶林、岳桦-苔原、高山苔原和云冷杉土壤。



注:大写字母KY、ZY、YL、YH、YT和GS分别代表阔叶林、针叶林、云冷杉、岳桦林、岳桦-苔原和高山苔原土壤;不同小写字母表示不同林型易氧化有机碳及颗粒有机碳含量差异显著($P < 0.05$)。

图1 不同林型土壤易氧化及颗粒有机碳含量

2.3 不同林型土壤团聚体组成及有机碳含量

由图2可知,2~0.25,0.25~0.053,<0.053 mm 粒级团聚体的比例分别为74.4%~90.8%,5.24%~22.7%,1.46%~9.38%。不同林型土壤相比,2~0.25 mm 粒级团聚体以高山苔原土壤最高,其次分别为岳桦-苔原、阔叶林、云冷杉、岳桦林和针叶林土壤;0.25~0.053 mm 粒级团聚体以岳桦林土壤最高,其次分别为针叶林、云冷杉、阔叶林、高山苔原和岳桦-苔原土壤;<0.053 mm 粒级团聚体以针

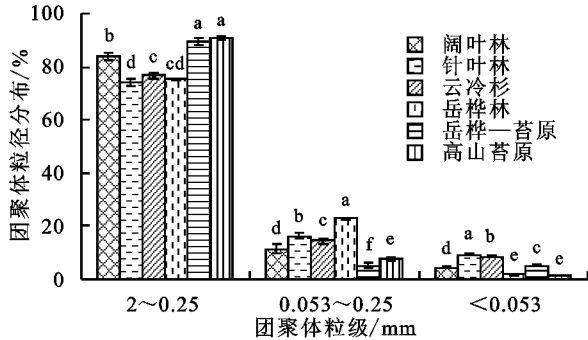
叶林土壤最高,其次分别为云冷杉、岳桦-苔原、阔叶林、岳桦林和高山苔原土壤。从平均重量直径(MWD)来看,针叶林土壤的MWD最高(1.10),其次分别为阔叶林(1.06)、岳桦林(0.98)、岳桦-苔原(0.69)、云冷杉(0.49)和高山苔原土壤(0.36)。

2~0.25,0.25~0.053,<0.053 mm 粒级团聚体的有机碳含量范围分别为9.46~73.3,6.28~59.3,26.3~55.2 g/kg。不同林型土壤相比,2~0.25,0.25~0.053 mm 粒级团聚体的有机碳含量均以阔叶林土壤最高,其

次分别为岳桦林、针叶林、岳桦—苔原、云冷杉和高山苔原土壤；而 <0.053 mm 粒径团聚体的有机碳含量则是以岳桦林土壤最高，其次分别为岳桦—苔原、阔叶林、高山苔原、云冷杉和针叶林土壤。

2.4 不同林型土壤及其黏粒组分中铁、铝氧化物含量

由表 3 可知，土壤游离氧化铁(Fe_d)和非晶质氧化铁(Fe_o)的含量范围分别在 1.92~12.8, 0.45~3.89 g/kg，其中以岳桦—苔原土壤最高，其次分别为



注：不同小写字母表示不同林型团聚体粒径分布及有机碳含量差异显著($P<0.05$)。

图 2 不同林型土壤团聚体组成及有机碳含量

表 3 不同林型土壤及其黏粒中铁氧化物含量

林型	土壤			黏粒(<0.002 mm)		
	$Fe_d/$ ($g \cdot kg^{-1}$)	$Fe_o/$ ($g \cdot kg^{-1}$)	$Fe_o/$ $Fe_d/\%$	$Fe_d/$ ($g \cdot kg^{-1}$)	$Fe_o/$ ($g \cdot kg^{-1}$)	$Fe_o/$ $Fe_d/\%$
阔叶林	11.20±0.20b	2.81±0.05b	24.9±0.01c	8.74	2.34	26.80
针叶林	1.92±0.15f	0.45±0.06f	23.5±0.00d	1.49	0.14	9.40
云冷杉	7.07±0.19d	1.76±0.05d	24.9±0.00c	5.89	0.42	7.13
岳桦林	4.79±0.16e	1.33±0.04e	27.8±0.00b	4.03	0.31	7.69
岳桦—苔原	12.70±0.03a	3.89±0.01a	30.5±0.01a	9.25	2.83	30.60
高山苔原	8.58±0.32c	2.14±0.08c	24.9±0.00c	6.93	1.13	16.30

注： Fe_d 为游离氧化铁； Fe_o 为非晶质氧化铁；同列不同小写字母表示不同林带铁氧化物含量差异显著($P<0.05$)。

由表 4 可知，土壤游离氧化铝(Al_d)和非晶质氧化铝(Al_o)的含量范围分别在 137~686, 24.5~152 mg/kg，而黏粒中， Al_d 和 Al_o 的含量范围分别在 10.3~228, 15.8~129 mg/kg，两者均以阔叶林土壤最高，其次分别为岳桦—苔原、岳桦林、高山苔原、针叶林和云冷杉土壤。

表 4 不同林型土壤及其黏粒中铝氧化物含量

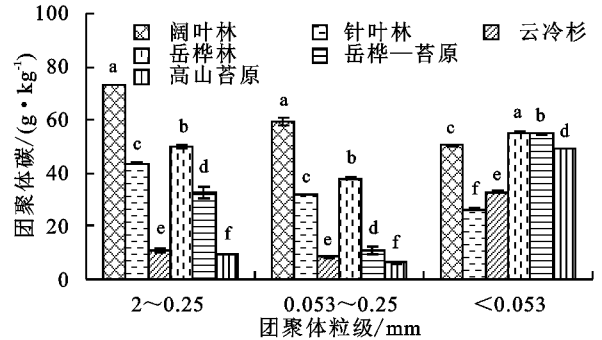
林型	土壤			黏粒(<0.002 mm)		
	$Al_d/$ ($mg \cdot kg^{-1}$)	$Al_o/$ ($mg \cdot kg^{-1}$)	$Al_o/$ $Al_d/\%$	$Al_d/$ ($mg \cdot kg^{-1}$)	$Al_o/$ ($mg \cdot kg^{-1}$)	$Al_o/$ $Al_d/\%$
阔叶林	686±0.34a	152.0±8.02a	22.1±0.01a	228.0	129.0	56.6
针叶林	215±0.13e	31.8±4.90d	14.7±0.02f	51.7	25.9	50.1
云冷杉	137±0.05f	24.5±8.01d	17.8±0.06e	10.3	15.5	150.0
岳桦林	372±0.19c	68.6±5.67c	18.4±0.02d	103.0	57.0	55.3
岳桦—苔原	607±0.32b	120.0±16.80b	19.7±0.03b	176.0	98.6	56.0
高山苔原	294±0.07d	56.3±12.40c	19.1±0.04c	62.0	46.6	75.2

注： Al_d 为游离氧化铝； Al_o 为非晶质氧化铝；同列不同小写字母表示不同林带铝氧化物含量差异显著($P<0.05$)。

2.5 土壤有机碳组分及铁、铝氧化物相关分析

由表 5 可知，有机碳与胡敏素碳呈显著相关($P<$

阔叶林、高山苔原、云冷杉、岳桦林和针叶林土壤。土壤活化度(Fe_o/Fe_d)范围在 23.5%~30.5%，而黏粒中， Fe_d 和 Fe_o 的含量范围分别在 1.49~9.25, 0.14~2.83 g/kg，两者均以岳桦—苔原土壤最高，其次分别为岳桦林、阔叶林、高山苔原、云冷杉和针叶林土壤。黏粒活化度(Fe_o/Fe_d)范围在 7.13%~30.60%，其中以岳桦—苔原土壤最高，其次分别为阔叶林、高山苔原、针叶林、岳桦林和云冷杉土壤。



0.01)，与非晶质氧化铝呈显著相关($P<0.05$)，颗粒有机碳与胡敏酸碳、粉粒呈显著相关($P<0.05$)，富

里酸碳与胡敏酸碳、游离氧化铝呈显著相关($P < 0.05$),大、微团聚体碳均与有机碳、颗粒有机碳呈显著相关($P < 0.05$),其中大团聚体碳还与粉粒呈显著相关($P < 0.05$),与微团聚体碳呈显著相关($P < 0.01$),

微团聚体碳与富里酸碳、游离和非晶质氧化铝均显著相关($P < 0.05$),粉粒和黏粒呈显著相关($P < 0.05$),游离和非晶质氧化铁之间呈显著相关($P < 0.01$),游离和非晶质氧化铝之间呈显著相关($P < 0.01$)。

表 5 土壤有机碳组分及铁铝氧化物相关分析

指标	SOC	POC	HAC	FAC	LSOC	MSOC	Sily	Fe _d	Al _d
SOC	1								
WSOC	-0.227								
EOC	0.047								
POC	0.582	1							
HAC	0.291	0.862*	1						
FAC	0.520	0.807	0.884*	1					
HUC	0.958**	0.360	0.008	0.262					
LOC	0.874*	0.878*	0.653	0.799	1				
MOC	0.847*	0.845*	0.731	0.872*	0.948**	1			
Sily	0.598	0.897*	0.573	0.573	0.843*	0.688	1		
Clay	0.534	0.709	0.356	0.356	0.725	0.480	0.909*		
Fe _d	0.474	-0.029	0.162	0.352	0.251	0.440	-0.301	1	
Fe _o	0.395	-0.030	0.215	0.426	0.236	0.421	-0.315	0.980**	
Al _d	0.774	0.615	0.651	0.817*	0.803	0.888*	0.382	0.747	1
Al _o	0.822*	0.587	0.590	0.764	0.801	0.889*	0.369	0.772	0.993**

注: WSOC 为水溶性有机碳含量(g/kg); EOC 为易氧化有机碳含量(g/kg); POC 为颗粒有机碳含量(g/kg); HAC 为胡敏酸碳含量(g/kg); FAC 为富里酸碳含量(g/kg); HUC 为胡敏素碳含量(g/kg); LOC 为 2~0.25 mm 大团聚体碳含量(g/kg); MOC 为 0.25~0.053 mm 微团聚体碳含量(g/kg); Silt 为粉粒含量(%); Clay 为黏粒含量(%); Fe_d 为游离氧化铁含量(mg/kg); Fe_o 为非晶质氧化铁含量(mg/kg); Al_d 为游离氧化铝含量(mg/kg); Al_o 为非晶质氧化铝含量(mg/kg); * 表示在 0.01 水平上呈显著相关; * 表示在 0.05 水平上呈显著相关; n=6。

3 讨论

3.1 土壤有机碳含量

森林土壤有机碳含量受植被凋落物的分解、矿化、转化和累积等综合过程的影响。不同的植被类型、海拔高度导致土壤的温度、水分、光照以及枯落物的质量和数量存在一定的差异,由此也致使土壤中有有机碳的动态平衡过程不同。本研究中,阔叶林和高山苔原分别处于长白山体底部和顶部,地带垂直分布性较差,使得各理化性质较其他 4 种林带的规律性较弱^[20]。

本研究结果表明,阔叶林由于海拔较低,水热条件充沛,植被长势良好,郁闭度更是高达 0.88,这使得凋落物的质量更好、数量更大,土壤动物的种类和数量也更加丰富,此外,阔叶林带土壤分泌物更多,且更易转换分解,有利于有机碳的累积^[21]。而高山苔原土壤有机碳含量降低到 43.6 g/kg,这归结于山地苔原土是火山锥上部,其母质为碱性的粗面岩和火山碎屑岩,由于土层发育浅,养分瘠薄,山顶风力大,光照强度大等因素,只能生长低矮灌木,这致使生物量减少,有机碳含量较少。另外 4 种林带中,岳桦-苔原的有机碳含量最高(表 2)。一方面是因为混交林

不同于纯林,其内部植被关系复杂,生物活性高,植被结构的复杂性使有机碳稳定程度、积累程度增加^[11],而随海拔高度的增加,雨量、湿度随之增大,植被演替速率加快,有机碳累积旺盛;另一方面,高海拔的潮湿和低温不利于有机质的矿化和分解,随海拔升高森林郁闭度增强,林下植被层光照强度减弱,温度降低,土壤微生物活动受阻,使得有机碳分解慢而积累较多,淋溶过程和灰化过程加强。

3.2 土壤有机碳组分含量

森林土壤中,枯落物及根系分泌物是腐殖物质的主要来源,其形成和积累在很大程度上还受到土壤环境及时间的影响。可提取腐殖物质(HE)主要是由胡敏酸(HA)和富里酸(FA)组成的,各林带间的腐殖质组分含量变化趋势近乎一致(表 2)。而具体到含量上,高山苔原带,岳桦林和针叶林的胡富比(HAC/FAC)均大于 1, HAC/FAC 比值可以作为评价土壤腐殖化程度的指标,该比值越大说明土壤的腐殖化程度越高^[17]。由于这 3 种林型成林时间长,土壤发育较完整,腐殖质更加稳定。

森林土壤水溶性有机碳主要以富里酸和分子量

较小的有机酸和碳水化合物为主^[6],其稳定性较差,使得外界环境因素对其干扰更为明显,如干湿冻融交替会破坏土壤团聚体,既迫使一些微生物难以接近的有机质暴露出来,又使微生物的死亡成为其来源之一。其二,包含岳桦林在内的海拔 1 800 m 以上的 3 种林带,除 7—9 月,终年覆盖大雪,使得水溶性有机碳得以积累,除此之外,土壤所持水分显得更为重要,随海拔而提升的雨量,水分梯度和地下水层分布直接决定了其含量,这就解释了云冷杉的水溶性有机碳较低的原因^[13]。

森林土壤易氧化有机碳受林分、林下微生态影响较大,尤其在人为扰动大片的成林下(如岳桦林、针叶林),土壤有机碳驻留时间发生变化,易氧化有机碳活性的波动更为剧烈^[7],使得易氧化有机碳在垂直地带性上规律性较差(图 1)。另一方面,微生物活性的增强有利于促进其他活性有机碳向易氧化碳转化^[13],也就是说,微生物对水溶性有机碳的贡献率高,势必导致对易氧化碳贡献率下降。

森林土壤颗粒有机碳主要来源于分解速率中等的植物残体分解产物^[8],而在含量上,其很大程度取决于土壤有机碳总量。由于植被类型不同,颗粒有机碳对总有机碳的贡献率也各有差异(图 1),高山苔原的颗粒有机碳是倒数第 2 位的,但对于有机碳的贡献占比却是第 3 位,这说明影响颗粒有机碳含量与质量间存在不对等关系。学者对数量和质量的分析,更进一步使颗粒有机碳有潜力成为考量土壤有机碳库变化程度的敏感性指标。

3.3 土壤团聚体碳含量

在土壤团聚体形成过程中,有机胶结物质起着重要的作用,其数量和质量更是对土壤的性质有格外的影响^[22]。在大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm)方面,团聚体碳呈现出阔叶林土壤最高,云冷杉土壤最低的趋势。这是由于阔叶林下又有较多灌木和草本覆盖,枯落物输入量多,土壤表层根系发达,动植物体扰动使得土壤容重、黏粒含量及其孔隙性等方面趋于良好发展,利于土壤结构体的形成和有机碳的输入,这与白秀梅等^[23]研究相一致。而 <0.053 mm 粒级,各林带团聚体碳趋于稳定,可能是由于 <0.053 mm 的粉黏粒颗粒较小,能够与胶结物质一起结合固化有机碳的能力较弱。

3.4 土壤铁铝氧化物

铁铝氧化物的存在有助于维持良好的土壤物理性质。森林土壤铁铝氧化物的活化度随海拔的升高而升高(表 3,表 4)。有研究^[24]表明,有机质富集和

高含水量,能够抑制氧化物氧化并加速其活化进程,使各种氧化程度的铁铝氧化物,发生溶解、螯合溶解和还原溶解,再经水解、氧化、聚合而成为非晶质氧化物,继续向游离态转化。有学者^[25]研究表明,游离态、非晶质氧化铁铝有利于有机碳的固定,这与本研究进行的相关性检验相一致。

4 结论

(1)不同林型土壤有机碳含量表现为高山苔原土壤最低,阔叶林土壤最高;岳桦林土壤的胡敏酸碳和富里酸碳含量最高,而云冷杉土壤最低;云冷杉土壤的颗粒有机碳含量最低,而阔叶林土壤最高;云冷杉土壤的水溶性有机碳最低,而岳桦—苔原土壤最高;高山苔原土壤的易氧化碳最低,而云冷杉土壤最高;高山苔原土壤的大团聚体(>0.25 mm)有机碳和微团聚体(<0.25 mm)有机碳最低,而阔叶林土壤最高。

(2)不同林型土壤团聚体的含量以 2~0.25 mm 为主,而不同林型土壤团聚体含量的差异在 0.25~0.053 mm 最为显著。不同林型土壤相比,针叶林土壤的团聚体稳定性最好,高山苔原土壤最差。

(3)不同林型土壤铁铝氧化物活化度随有机碳含量的升高而升高,黏粒中的各形态氧化铁铝占较大比重。各形态铁氧化物在不同林带间差异显著,游离氧化铝在不同林带间差异显著,非晶质氧化铝在高山苔原与岳桦林、云冷杉与针叶林间均不显著。

(4)本研究的相关分析表明,SOC 与 HUC、LOC、MOC 和 Al₁ 存在显著正相关关系,说明 SOC 含量较高的土壤更能稳固非活性有机碳,促进土壤团聚体形成过程并提高团聚体的稳定性。

参考文献:

- [1] 尚瑶,傅民杰,孙宇贺,等. 温带阔叶林土壤有机碳及其颗粒组分空间分布特征[J]. 水土保持学报,2014,28(5):176-181,301.
- [2] 徐慧凤,刘兴土,陈景文. 长白山区沟谷沼泽湿地乌拉苔草(*Carex meyeriana*)地上生物量与土壤有机质和氮素相关性分析[J]. 农业环境科学学报,2008,6(1):356-359.
- [3] Keiluweit M, Nico P S. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar) [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44(4): 1247-1253.
- [4] 刘中良,宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报,2011,19(2):447-455.
- [5] 胡慧蓉,马焕成,罗承德,等. 森林土壤有机碳分组及其测定方法[J]. 土壤通报,2010,41(4):1018-1024.
- [6] Imre S, Timea M, Willy M. Mass size distribution of carbon in atmospheric humic-like substances and water soluble organic carbon for an urban environment [J]. Journal of Aerosol Science, 2013, 56: 53-60.

- ca Journal, 1984, 48(4): 814-818.
- [20] 陈康, 邓兰生, 涂攀峰, 等. 不同水肥调控措施对马铃薯种植土壤养分运移的影响[J]. 广东农业科学, 2011, 38(20): 51-54.
- [21] 刘瑞, 戴相林, 郑险峰, 等. 半旱地不同栽培模式及施氮下农田土壤养分表观平衡状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 934-941.
- [22] 黄莹, 赵牧秋, 王永壮, 等. 长期不同施磷条件下玉米产量、养分吸收及土壤养分平衡状况[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 694-701.
- [23] 张晓光, 田迎宇, 兰富军, 等. 氮肥用量对白萝卜产量与水分利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(1): 33-36.
- [24] 马强, 刘中良, 周桦, 等. 不同施肥模式对作物-土壤系统养分收支的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 520-524.
- [25] Palm C A, Myers R J K, Nandwa S M. Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment[C]//Buresh R J, Sanchez P A, Calhoun F. Replenishing Soil Fertility in Africa. Soil Science Society of America. Special Publication No. 51. Madison, 1997: 193-217.
- (上接第184页)
- [7] Chen Y, Chen G, David R. Large amounts of easily decomposable carbon stored in subtropical forest subsoil are associated with r-strategy-dominated soil microbes [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 95: 233-242.
- [8] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 土壤颗粒有机质研究进展[J]. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4(4): 43-52.
- [9] Vasilevich R S, Beznosikov V A. Effect of climate changes in the holocene on the distribution of humic substances in the profile of forest-tundra peat mounds [J]. Soil Chemistry, 2017, 11: 1312-1324.
- [10] 薛龙飞, 罗小锋, 吴贤荣. 中国四大林区固碳效率: 测算、驱动因素及收敛性[J]. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1351-1363.
- [11] 赵山山. 温带森林土壤有机碳特征初步研究[D]. 长春: 东北林业大学, 2013.
- [12] Wang D, He N, Wang Q, et al. Effects of temperature and moisture on soil organic matter decomposition along elevation gradients on the Changbai Mountain, northeast China [J]. Pedosphere, 2016, 26: 399-407.
- [13] 张雪, 韩士杰, 王树起, 等. 长白山白桦林不同演替阶段土壤有机碳组分的变化[J]. 生态学杂志, 2016, 35(2): 282-289.
- [14] Zhang M, Zhang X K, Liang W J, et al. Distribution of soil organic carbon fractions along the altitudinal gradient in Changbai Mountain, China [J]. Pedosphere, 2011, 21(5): 615-620.
- [15] 鲁如坤. 土壤农化分析手册[M]. 3版. 北京: 农业科技出版社, 2000.
- [16] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Australian Journal of Agriculture Research, 1995, 46: 1459-1466.
- [17] Zhang J, Hu F, Li H, et al. Effects of earthworm activity on humus composition and humic acid characteristics of soil in a maize residue amended rice-wheat rotation agroecosystem [J]. Applied Soil Ecology, 2011, 51: 1-8.
- [18] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distributions in aggregates from cultivated and grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57: 1071-1076.
- [19] Elliott E, Palm C, Reuss D E, et al. Organic matter contained in soil aggregates from a tropical chronosequence: Correction for sand and light fraction [J]. Agriculture Ecosystems Environment 1991, 34: 443-451.
- [20] 郭聃. 长白山植被垂直带地形控制机制研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2014.
- [21] 李步杭, 王绪高, 张健, 等. 长白山温带森林阔叶红松林及其次生杨桦林的物种组成及其分布格局[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [22] 于海艳, 宫汝宁, 周娅, 等. 北京八达岭地区4种人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 162-166.
- [23] 白秀梅, 韩有志, 郭汉清. 庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1654-1662.
- [24] Wilson C A, Cloy J M, Graham M C, et al. A micro-analytical study of iron, aluminium and organic matter relationships in soils with contrasting hydrological regimes [J]. Geoderma, 2013, 202/203: 71-81.
- [25] 衡利沙, 王代长, 蒋新, 等. 黄棕壤铁铝氧化物与土壤稳定性有机碳和氮的关系[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2748-2755.